

原電技術開發의 動向과 展望



申 載 仁 (核工學博士)
韓國電力技術(株) 技術本部長

1. 原子力에너지의 活用

현재까지 인류가 영위해온 도도한 文明의 흐름은 제레미 레프킨의 엔트로피 世界觀을 빌릴 필요도 없이 에너지 사용과 같이 시작되었으며 사용에너지의 양상에 따라 발전해 오고 있다. 인류초기의 文明은 자연에너지를 생활의 방편으로 삼아 왔으나 그다지 큰 진전을 이룩해놓은 업적을 헤아릴수는 없으며 실제로 文明의 발달이 커다란 가속을 얻기 시작한 것은 1760년경에 일어난 산업혁명으로 우리가 필요한 動力을 창조해낸 뒤 부터라고 할 수 있다. 그러나 이러한 사실은 그 유구한 인류의 역사중에서 불과 최근의 250년에 해당되는 분량에 불과하다. 이에 따라 천연가스, 石炭 그리고 石油를 주종으로 하고 있는 화석연료는 산업혁명 이후로 부터 인류가 필요로 하는 일차에너지를 제공하는 주된 공급원이 되었으며 Ibid 자료에 의하면 자유 세계의 1986년 1차 에너지사용의 45%는 石油가 22%는 石炭이 그리고 18%는 천연가스가 담당함으로써 총 85%의 필요한 에너지를 화석연료가 제공해주고 있는 셈이 된다.

그러나 화석연료는 에너지화하는데 사용이 간편하며 효율이 좋고 취급에 큰 위험을 수반하지 않기 때문에 많은 분야에서 애용되고 있지만 고갈성 에

너지로서 사용시기의 한계성과 자원부존상 지역적인 편재성 그리고 최근에 심각하게 고려되고 있는 산성비, 온실효과와 같은 환경공해문제 때문에 준영구성이 있는 무공해 에너지 공급원이 갈구되고 있다. 原子力에너지는 이러한 인류 미래에너지 공급의 거대한 희망을 안고서 전력을 공급하는 “복합성 에너지”로서 개발되었다.

현재 原子力은 자유세계의 약 6.6%에 해당되는 일차에너지로서 약 15%에 해당하는 電力에너지를 경제적으로 공급하고 있으며 일차에너지중 전력이 차지하고 있는 비중이 점점 커져 가고 있는 현재의 추세를 그대로 따른다면 原子力의 활용은 앞으로 더욱 심화될 전망이다.

그러나 파괴적인 군사무기로 맨처음 활용되었던 原子力에 대한 國民의 오해와 불신 그리고 TMI와 Chernobyl 사고에 따른 실제적인 原子力安全문제의 의혹이 原子力에너지의 지속적인 개발을 저해하는 요소로 등장하고 있다. 따라서 현재 원자력 발전형태에 대한 기술의 개발은 이러한 장애물들을 제거하는 즉 안전성을 높이며 경제성을 제고하고 환경공해를 제로화 하는데 주력하고 있으며 상당한 실적을 올리고 있다.

본고에서는 이러한 原子力發電기술의 과거 진화과정과 앞으로의 전망을 안전성, 경제성 측면에서

살펴봄으로써 앞으로 무한한 수소연료로 무공해의 핵융합발전을 이룩하여 인류 에너지원의 한계성을 탈피하는 주중 에너지공급원으로서 사용될 原子力 에너지의 현재와 미래의 모습을 경수로건설 운용 기술을 중심으로 하여 살펴보도록 하고자 한다.

2. 原電의 安全性 확보 개념의 변천 - 절대 안전에의 도전

현재 核分裂 에너지를 사용하고 있는 原子力發電의 가장 큰 저해요소는 핵연료가 집결되어 있는 노심이 용융되어 강력한 방사성 물질이 외부로 방출되고 이에 따른 주민들의 방사선 피해가 유발되는 중대사고가 발생될 수 있는 가능성에 있다.

핵분열을 적절히 제어하여 질량결손의 原子力 에너지를 이용하기 시작한 것은 1942년 시카고 대학의 E. 페르미가 세운 원자로가 시초이다. 이 원자로는 현재의 발전로에 비하면 옷을 입히지 않고 나체의 원시 원형개념으로 소련의 Chernobyl 原電과 같이 흑연 감속재를 사용하고 있다. 이 원자로는 주로 군사목적으로 사용되어 플루토늄의 생산에 이용되었으나 미국, 영국등지에서 심각하지는 않았지만 이미 노심용융의 사고를 경험하게 된다.

현재와 같은 상업용 동력로는 1957년 미국의 시핑포트(Shipping Port)에 세운 발전로가 최초가 된다. 이 原電은 원시의 원자로에서 경수로로 전환하였으며 노심의 용융과 같은 사고를 방지하기 위해서 이상시에 작동시킬 수 있는 공학적 안전설비(Engineered Safety Features)와 갑옷과 같은 두꺼운 원자로 격납건물을 추가함으로써 다중방호벽을 쌓은 안전장치를 갖추게 되어 노심의 용융확률이 $\sim 1 \times 10^{-4} / R. Yr$ 로 제로화 하게 된다. 그러나 이러한 확률적인 논거에도 불구하고 1979년 美國에서 TMI의 사고를 경험하게 되며 인간적인 실수와 기계와의 복합적 요인이 사고원인이었음을 알아내고 인간공학(인간과 기계, 인간과 인간관계의 공학적 법칙)을 원전설계에 적용할 수 있도록 보완조치를 취하게 하고 안전설계 개념으로도 단순한 기계적이고 구조적인 안전성만을 추구하지 않고 설계, 건설, 原電의 운전 전과정에 안전성을 복합적으로 추구하게 되는 심층방어개념(Defence-in-De-

pth)을 적용하게 된다. 그러나 이러한 인간요소의 결합은 항상 安全性의 확보를 위해서 운전원의 부단한 교육과 훈련, 發電所의 완벽한 점검과 정비를 요구하게 되어 최근에는 미래 건설될 원전을 위해서 절대안전의 설명이 가능하도록 安全 확보 개념을 변화시키고 있다. 즉 운전원 부재원칙(Walk-Away Principle)과 자연현상을 이용한 수동개념(Passive Concept)이 사용되고 있어서 고유안전로(Inherently Safe Reactor)의 건설이 실현될 전망이다. 이러한 원전의 안전확보개념은 특성상 항상 위험의 가능성을 내포하고 있는 기계와 인간의 요소를 제거하고 중대사고의 요인이 발생되었을 경우에도 자연대류의 현상이나 중력에 의한 즉 자연적인 힘에 의한 자동 냉각제의 유입으로 운전원의 도움이 전혀 없어도 원전의 노심이 용융의 사고에서 탈피할 수 있도록 하는 개념이다.

이러한 수동개념을 부분적으로 적용하고 있는 원자로의 개념은 美國의 웨스팅하우스사가 AP-600, CE사가 SIR, GE사가 SBWR 등을 개발하고 있어서 1995년경에는 상업화될 전망이다. 완전한 수동개념을 적용하고 있는 고유 안전로는 스웨덴 A-A회사의 PIUS, 일본의 ISER 등이 개발중에 있고 이들은 실증 및 상업운전을 위해서는 2000년 이후에야 실용 가능할 것으로 생각된다.

경수로 이외에도 가스로인 MHTGR, 고속중식 로인 LMFBR이 이러한 개념을 적용하여 개발중에 있어서 핵융합 에너지를 인류가 사용하기 전 단계로 핵분열 에너지를 활용하는 원자력 발전은 안전과 경제적 개념에서 인류 창조기술의 극치를 달하는 결정체로서 절대안전에 준하는 안전성을 확보함으로써 원전의 안전성에 대한 논쟁을 불식시킬 수 있는 계기를 이룩할 수 있을 것으로 전망된다.

이러한 안전성 확보를 가시화하기 위해서 미국은 1985년에 중대사고 정책을 표명하여 후후 건설될 원전은 4가지의 요건을 만족시키도록 요구하고 있다.

- 1) 현재 NRC가 요구하고 있는 모든 안전요건들의 만족
- 2) 기술적으로 미해결로 남아있는 모든 문제들에 대한 해결
- 3) PRA의 수행
- 4) 노심손상에 대한 해석과 사전 검증

〈표 1〉 원전 안전성 확보개념과 진화

내용	단계	I	II	III	IV
안전성 확보 개념		단순제어 및 냉각	다중방호 (물리적인 안전 체계 확보)	심층방어 (인간공학 개념의 가미)	고유안전성 (자연법칙의 응용)
안정성 확보 방법		단순제어 및 냉각	공학적인 안전 설비와 격납 건물	인간과 기계, 인간과 인간관계 (MMI)의 요소 고려 첨단 계측제어 장비의 적용	운전원 부재원칙 및 수동개념의 적용
노심용융의 발생확률 (-/R, Yr)		$\sim 1 \times 10^{-3}$	$\sim 1 \times 10^{-4}$	$\sim 1 \times 10^{-5}$ (운전원의 특별 조치가 없어도 중대사고후 20분 내 노심용융이 발생안됨)	$\ll 1 \times 10^{-6}$ (운전원의 특별 조치가 없어도 노심용융발생 안됨)
적용시기		1942	1957년 이후	1979년 이후	(2000년 이후)
원전의 종류		-	Shipping Port Dresden 등	TMI 사고후 개량 된 원전(개량로)	SLOWPOKE ISER PIUS MHTGR LMFBR 등 부분적 안전로 W : AP-600 CE : SIR GE : SBWR

3. 新技術접속과 原電 經濟性 提高 - 안전성과 경제성의 병합

현재 추진되고 있는 原電의 기술개혁 내용을 살펴보면 이제까지의 상식적으로 우리가 알고 있는 개념이 산산히 부서지고 있는 현상이 보이게 된다. 그중 가장 뚜렷하게 나타나고 있는 것이 안전성 향상과 경제성제고이다. 상식적인 의미에서 이 두개념은 서로 상반되어 왔으며 따라서 안전성을 높이기 위해서는 경제성이 손실되었으며 經濟性 提高를 위해서는 安全性이 저하되었다.

그러나 그동안 原電은 安全性 확보를 위해서 무

수한 추가적인 계통이나 기기들의 접속을 수행하여 왔으며 반면에 신기술의 적용은 등한시한 관계로 과도한 계통이나 기기의 사용이 原電의 經濟性을 저하시키고 보수적인 설계개념으로 설계의 여유도를 증폭시켜 발전원가의 상승요인이 되었다.

새로운 공학적인 분석 및 평가기술의 발달과 개량된 기기의 原電에 대한 응용은 따라서 原電의 安全性을 향상시킬뿐만 아니라 경제성을 제고시키는 일거이득의 효과를 거두게 된다.

원전의 경제성을 제고시키기 위해서 사용되는 주요 방안으로는 다음과 같은 방법이 사용되고 있다.

1) 不必要한 系統이나 機器의 單純化

- 웨스팅하우스의 AP-600을 예로하면 60%의 밸브가 감소될 수 있으며 50%의 펌프, 60%의 배관, 50%의 열교환기, 80%의 제어케이블 등이 절감된다고 예측하고 있다.

2) 利用率의 向上

- 현재 연간 1회씩 수행되고 있는 핵연료의 교체를 길게하며(장주기운전) 기기 신뢰도 향상, 연료교체 및 검사기간의 단축, 운전성/보수성의 향상추진을 하여 90%의 이용률을 달성토록 한다. 현재 국내원전의 평균 이용률은 75-80% 수준이다.

3) 건설공기의 단축

- 모듈화를 통한 조립건설의 채택과 그외에도 수직굴착을 위시한 특수공법의 개발, 표준기기의 사용, 설계의 사전완료, 건설성을 고려한 설계 그리고 표준 건설사업관리의 사용으로 착공후 54개월 이내에 상업 운전에 들어가도록 계획한다.

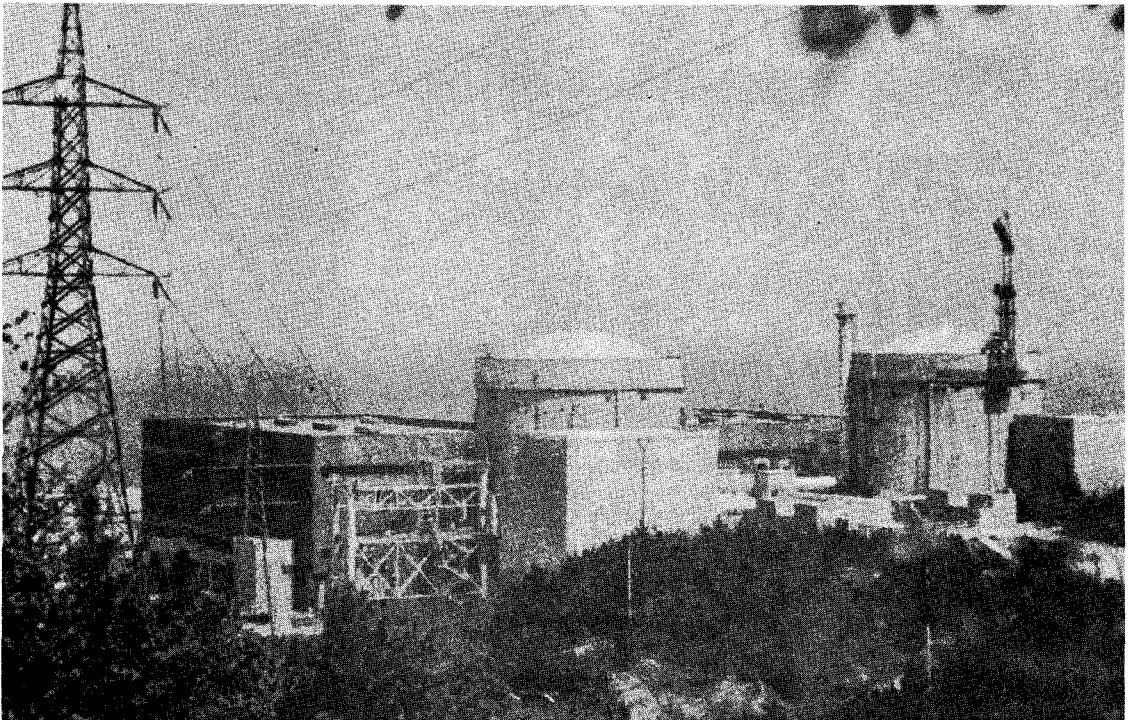
이외에도 원전 수명기간을 현재 30년에서 60년으로 연장하고 원전에서 발생하는 방사성폐기물의 양을 1/4로 감소시키며 핵연료의 연소도를 높여서 경제성을 높이도록 하고 있다.

이러한經濟性提高를 통해서 미국의 경우 현재 단위 KW당 \$2000이상의 대역에 있는 원전의 경제성을 \$1200 수준으로 낮추도록 계획되고 있다.

4. 原電의 標準化

세계적으로 原電건설이 침체되어 있을때 원전국들 모두가 유행병처럼 몸살을 앓고 있는 일이 원전의 표준화이다.

原電의 標準化는 그동안 原電이 건설시마다 사용자가 주문하는 조건에 따라 건설되며 원자로의 형태와 BOP의 설계 또한 제작자와 설계자에 따라 각양각색을 띄우고 있었던 것을 단일화해 나가는 작업이다. 많은 원전개념의 난립은 기술의 반복성에 따른 경제적, 안전측면에서의 이득, 표준기기의



사용에 따른 국산화증대와 경제적인 이득, 건설 인허가의 단순화, 운전과 보수의 편리성을 상실하도록 하여 다른 에너지원과 비교하여 원자력에너지의 경제적 우위성을 지속적으로 그리고 상대적으로 하락시키고 있었다. 단지 불란서만은 오래전에 原電의 단일 표준화를 추진 완성함으로써 이러한 이득을 일찍부터 얻고 있었다.

원전표준화의 구체적인 방법과 내용은 세계 원전국들이 자국의 형편과 사정에 따라 다르게 사용하고 있으나 공통적으로는

- 1) 설계표준화
- 2) 사전 건설 인허가를 위한 기본설계
- 3) 일반 표준기기의 사용
- 4) 최신 기술과 기자재를 이용한 모듈화된 제어/계측계통 채택
- 5) 부하추종 능력의 향상

등의 특색을 지니고 있다.

美國은 정부기관인 NRC와 전력업체의 공동연구소인 EPRI가 주관하여 원전표준화를 추진하고 있으며 '불란서, 영국, 대만은 전력회사가 일본, 독일은 원전제조업체가 수행하고 있다. 캐나다 또한 AECL이 CANDU-6 MK-III의 개발을 서두르고 있다.

5. 국내 原電建設 技術의 發展

국내에서는 11기의 原電을 설계하거나 건설해 오면서 자체기술의 확보와 신기술의 개발을 위해서 정책적으로 꾸준히 노력해 왔으며 현재 상당한 성과를 얻고 있다.

국내 原電技術의 개발은 이제까지 외국의 기술을 그대로 직수입하던 형태에서 탈피하여 국내의 산업조건에 맞도록 하며 특히 안전에 관련된 기술에 대해서는 국산화함으로써 원전건설 운용에 걸쳐 독자적인 원전의 안전성을 확보하도록 하고 있다.

특히 현재 건설중에 있는 영광 3/4호기의 사업 수행을 통해서 현존 원전기술의 완벽한 기반구축을 추진하고 있으며 이외에도 원전기술의 자주화를 위해서 원전 표준화사업, 기술기준 및 규격의 제정등 기술의 기본적인 틀을 완성하는데 주력하고 있다.

安全性 확보와 경제성제고를 목적으로 하는 미래 기술의 개발로는 원전의 수명연장, 원전 부하추종 기술개발, 신형로 개발에 대한 타당성 연구, PSA분석기술, 인공지능(AI)의 이용 첨단계측/제어기술의 개발, FBR 기초기술에 대한 부분적인 연구 그리고 안전연구등이 진행중에 있으나 전반적으로 아직까지는 활성화 되어있는 형편에 있지 못하다. 특히 原電技術의 개발은 국내에서의 원전 건설 계획, 노형전략, 표준화전략등 중장기 정책과 연계되어 수행되어야 하며 가용 기술개발 인력, 투자능력, 관련산업의 기술수준등이 모두 고려되어 결정되어야 함으로 이러한 관점에서의 종합 기술 개발 계획이 성안중에 있다.

6. 結 論

세계적으로 에너지원에 대한 선택방향은 산업혁명 이후 이제까지 화석연료를 주종으로 하여 영위되어 왔다. 그러나 최근에 심각하게 제기된 산성비나 온실효과와 같은 화석연료에 의한 환경오염 문제가 심각하게 제시된 이후 군사무기화와 안전성의 이유로 거부반응을 보여왔던 原子力에너지의 발전에 대한 사용이 호의적으로 재고되기 시작하고 있다.

본래 原子力에너지는 궁극적으로 핵융합 에너지의 사용을 목적으로 하여 인류에 영구적 무공해 에너지를 공급하려는 미래형 주종에너지로 설명되어 왔으나 현재로는 핵분열에너지를 주로 이용함으로써 방사능 물질의 생성과 방출에 대한 안전문제가 큰 장애요소로 대두되어 왔으나 근래 기술개발은

단순 물리적인 안전체계 확보→인간공학 요소가 가미된 안전개념 추가→자연법칙을 응용한 수동 안전개념으로 변환

되는 과정을 거쳐서 궁극적으로 중대사고의 발생을 방지함으로써 원전에 대한 안전문제를 불식시킬 수 있도록 하고 있다.

본고에서는 이러한 기술의 변천을 安全性 확보 측면과 經濟性제고 측면에서 살펴보고 국내의 동향을 소개하였다.